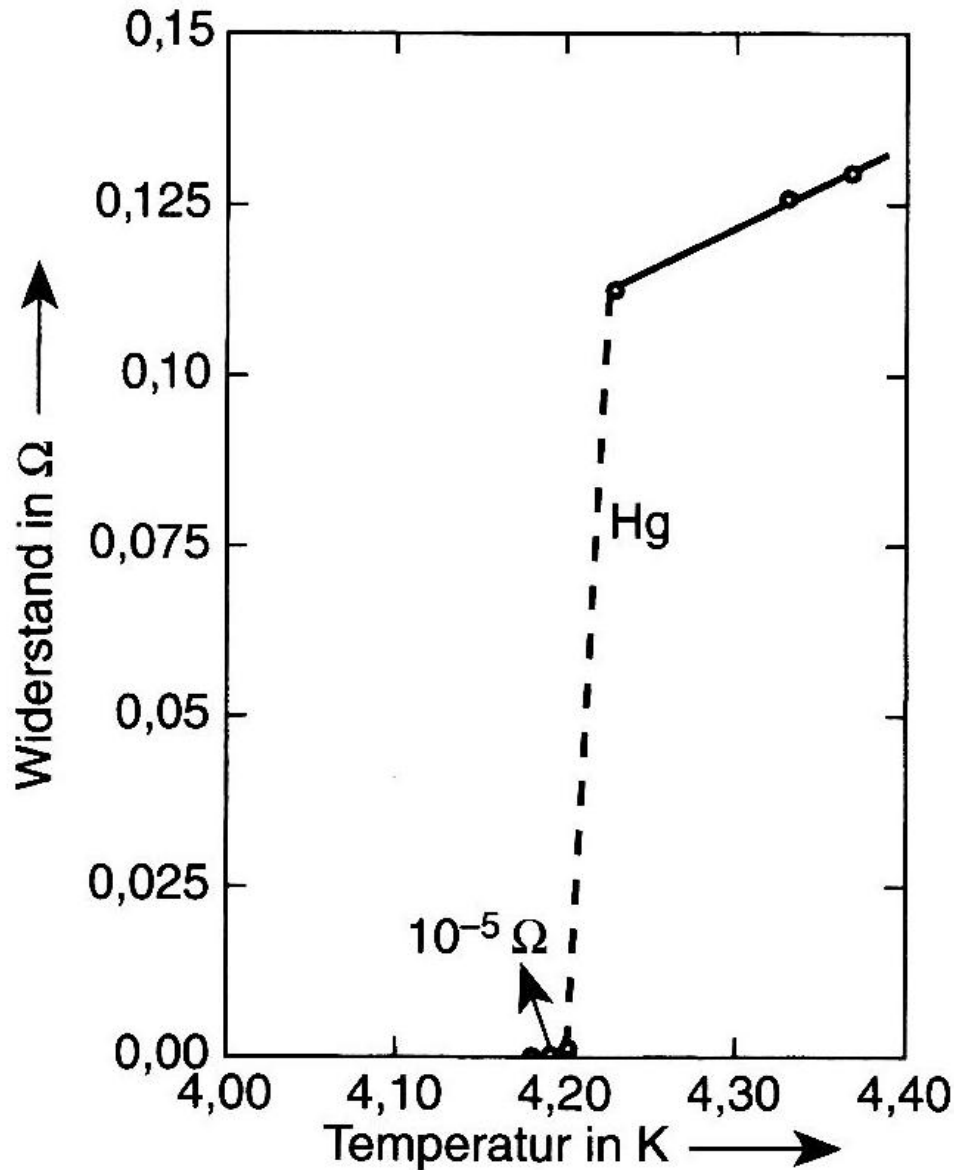


Superconductivity

Normal metal (N):

$$\rho = \rho_0 + a T^5 \quad \text{at } T \ll \theta_D$$

non-magnetic impurities & phonons



Superconductor:

$$\rho = 0 \quad \text{at } T < T_c$$



Heike Kamerlingh Onnes

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE
■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

	IA												0					
1	1											2	2					
	IIA											IIIA	IYA	VA	VIA	VIIA		
1	3	4											5	6	7	8	9	10
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
2	11	12											13	14	15	16	17	18
	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VII	IB	IIIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
3	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
4	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
5	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
6	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112						
	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112						
7													<i>SUPERCONDUCTORS.ORG</i>					

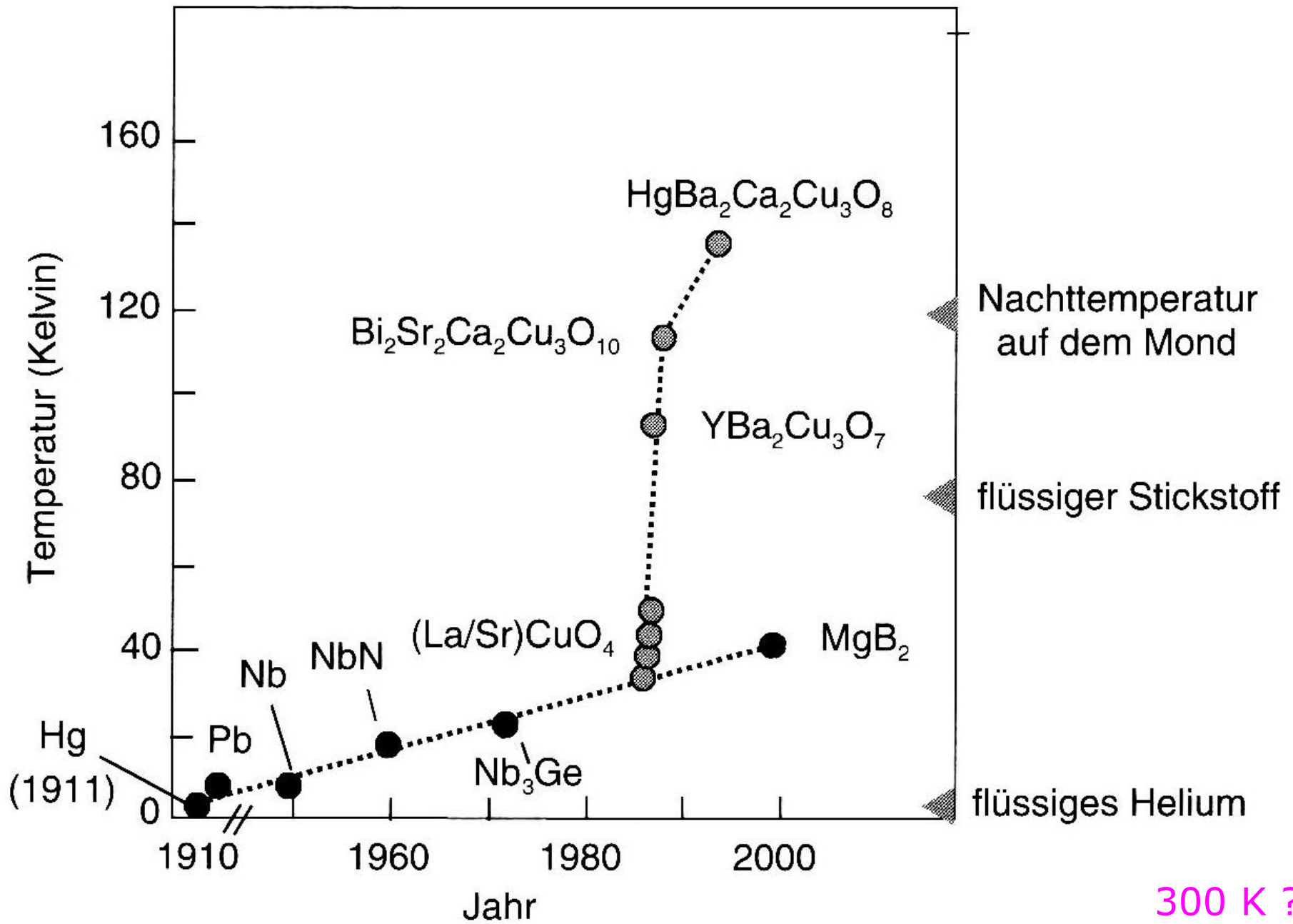
* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Most metals are superconductors

Some Type 1 Superconductors

Lead (Pb)	7.196 K
Lanthanum (La)	4.88 K
Tantalum (Ta)	4.47 K
Mercury (Hg)	4.15 K
Tin (Sn)	3.72 K
Indium (In)	3.41 K
Thallium (Tl)	2.38 K
Aluminum (Al)	1.175 K
Gallium (Ga)	1.083 K
Molybdenum (Mo)	0.915 K
Zinc (Zn)	0.85 K
Osmium (Os)	0.66 K
Cadmium (Cd)	0.517 K
Ruthenium (Ru)	0.49 K
Titanium (Ti)	0.40 K
Uranium (U)	0.20 K
Hafnium (Hf)	0.128 K
Iridium (Ir)	0.1125 K
Beryllium (Be)	0.023 K
Tungsten (W)	0.0154 K
Lithium (Li)	0.0004 K
Rhodium (Rh)	0.000325 K

$T_c(t)$



300 K ?

Persistent current

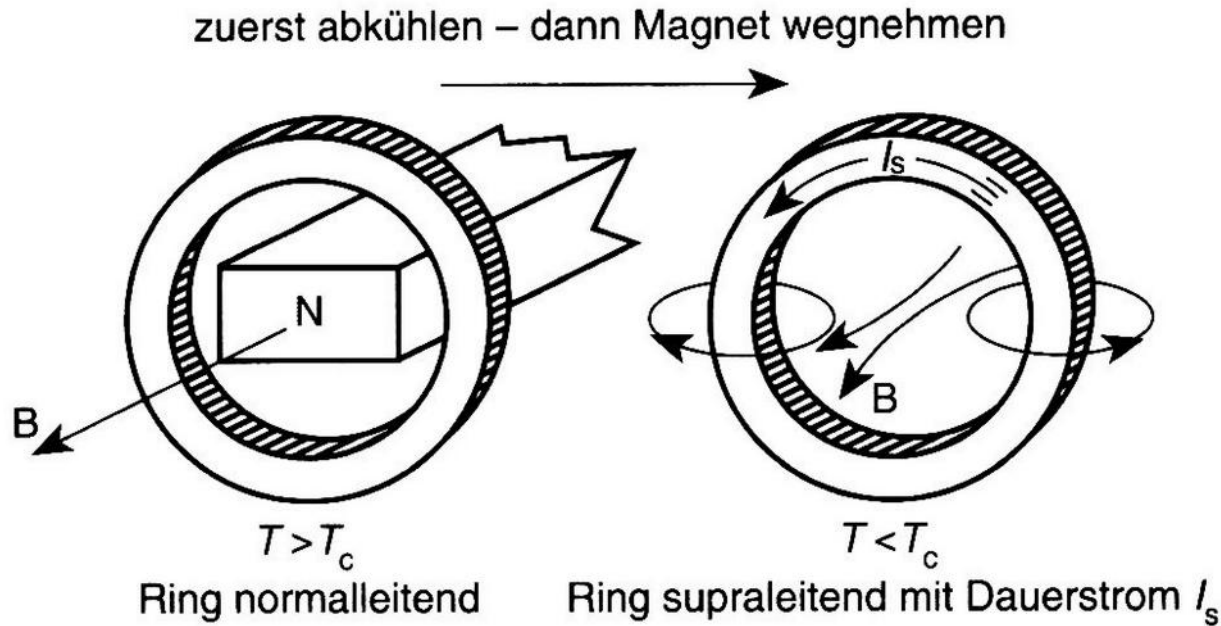
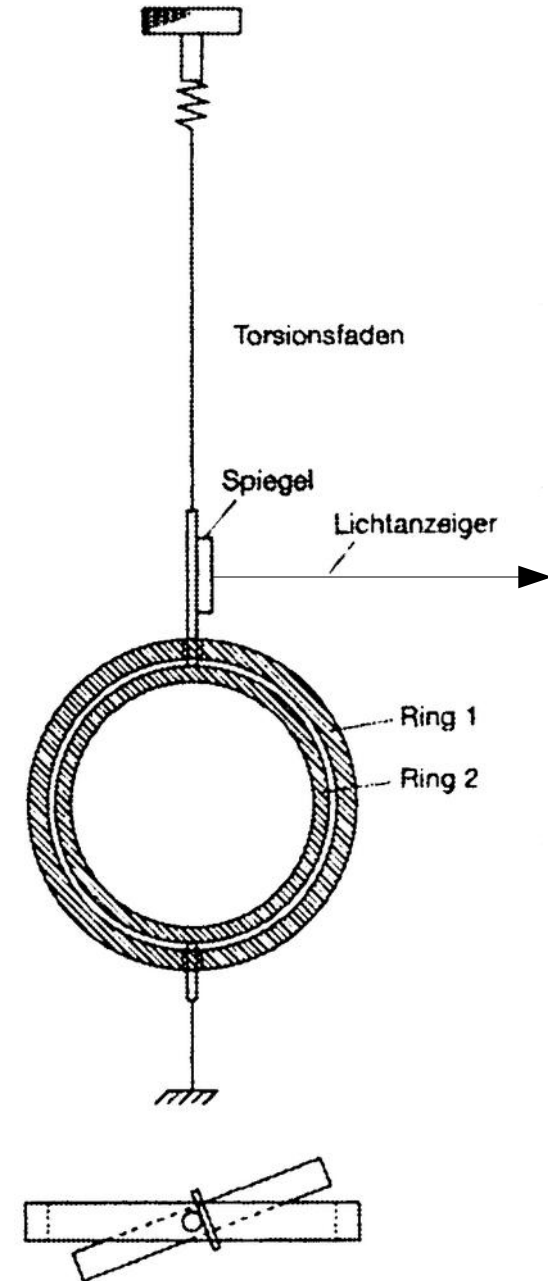


Abb. 1.1 Erzeugung eines Dauerstroms

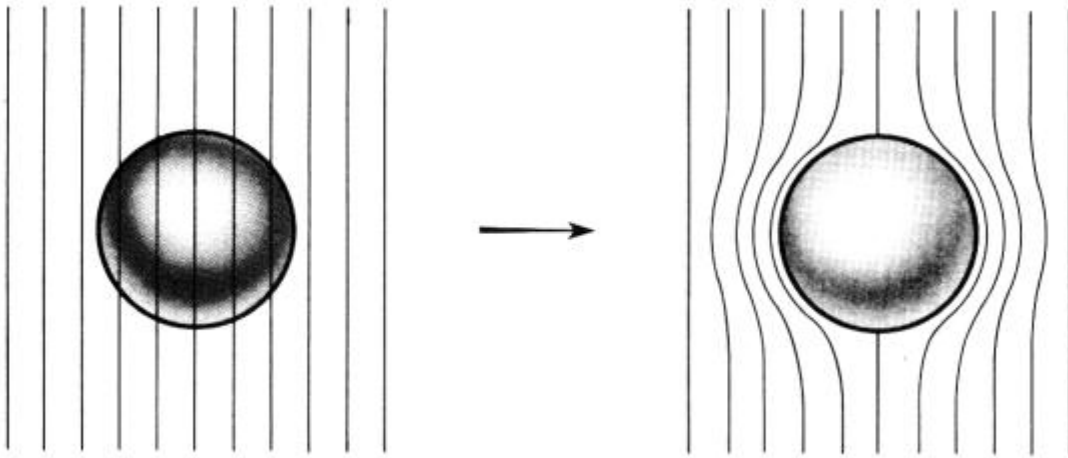
No decay detected over 2.5 years

No dissipation

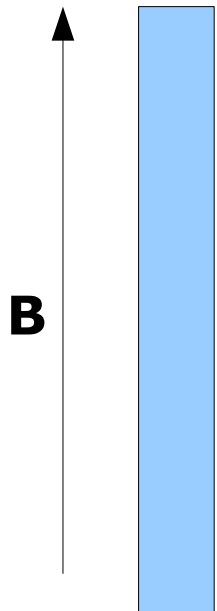
Minimum estimated decay time > age of universe



Meißner-Ochsenfeld-Effect (1933)



B field does not penetrate
= superconductors display
perfect diamagnetism



$$\mathbf{B}_{\text{in}} = 0$$

$$\rightarrow \mu_0 \mathbf{M} + \mathbf{B} = 0$$

$$\rightarrow \mathbf{M} = -\mathbf{B} / \mu_0$$

$$\rightarrow \chi = -1$$

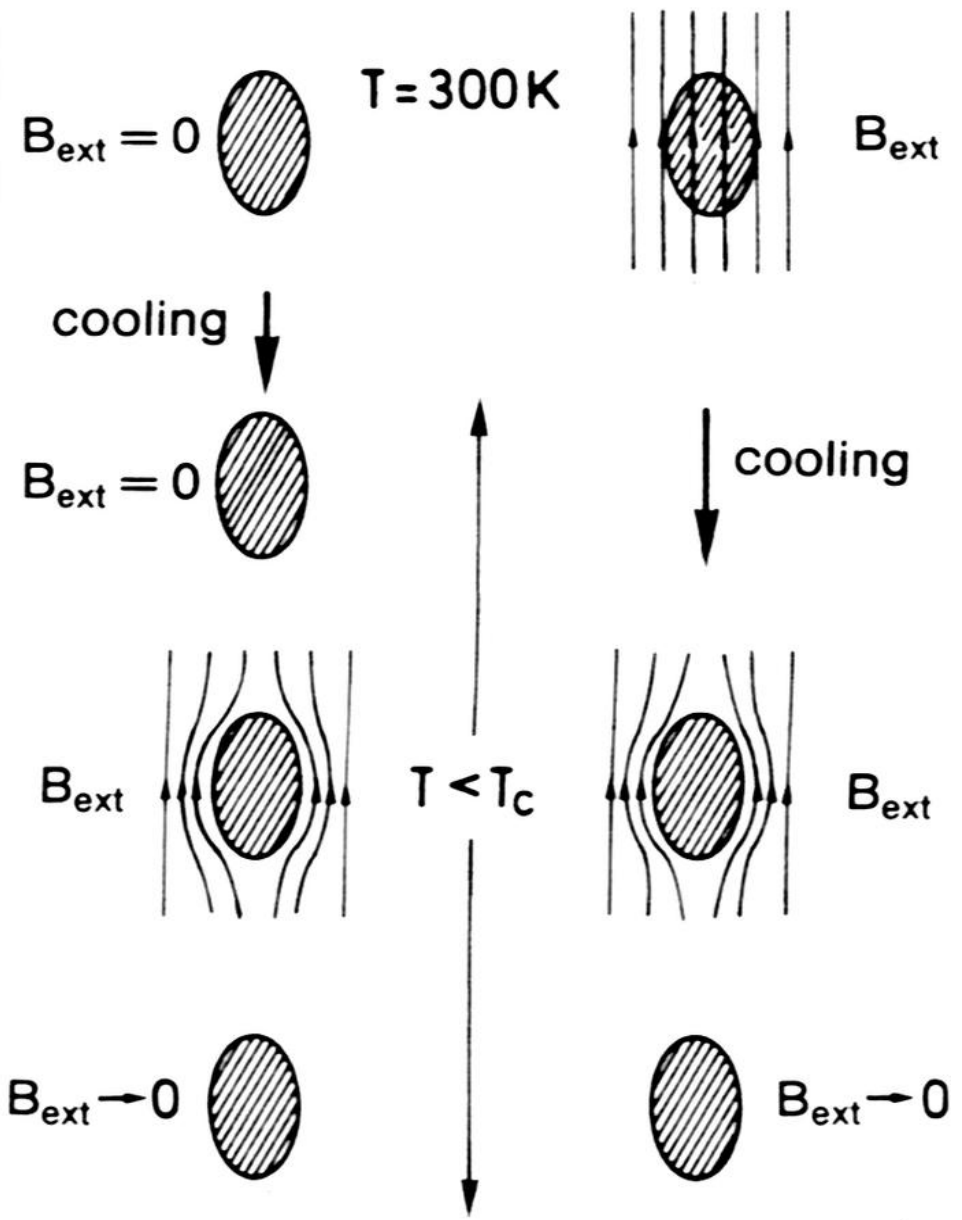
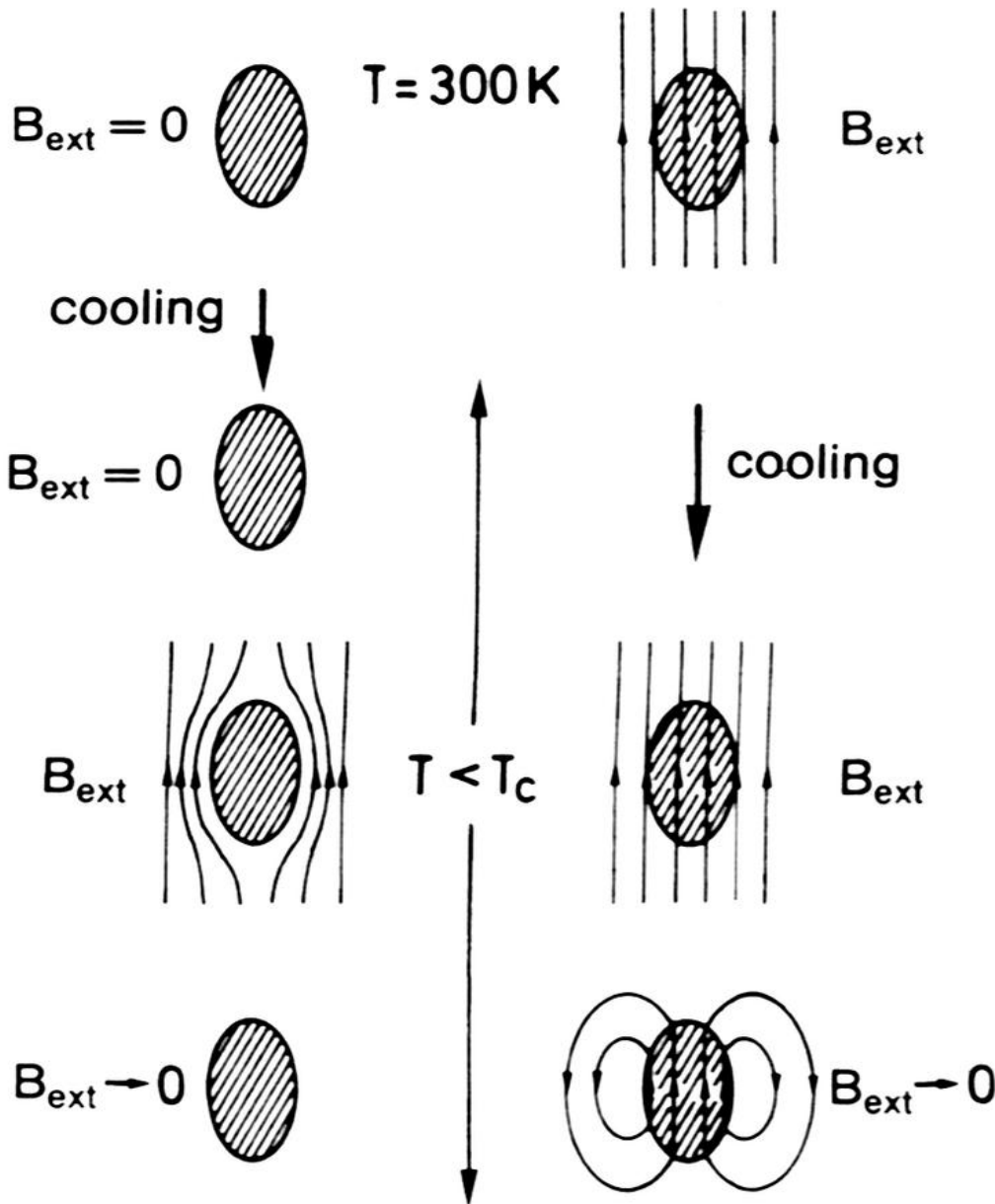


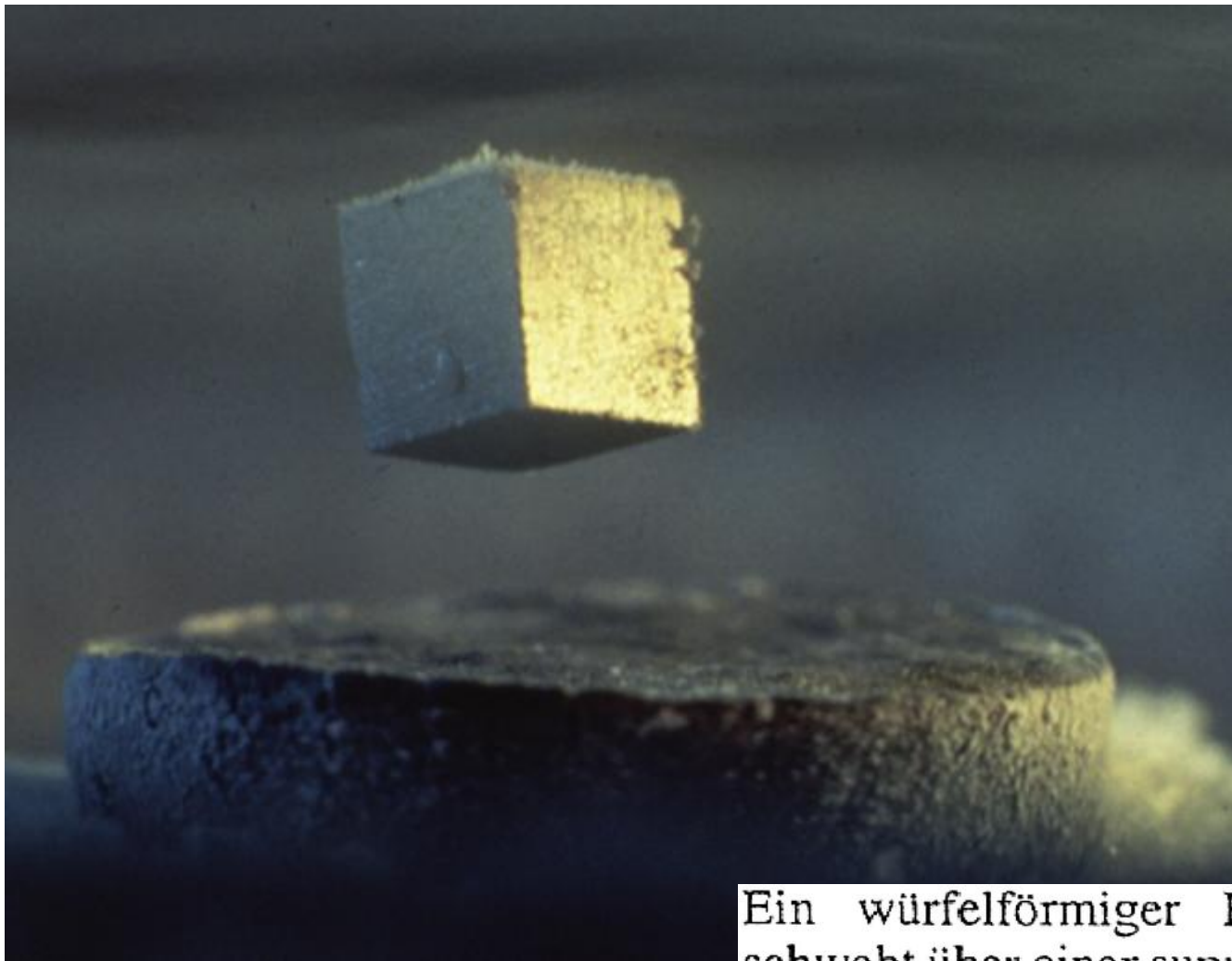
Walter Meißner

Perfekter Leiter vs. Supraleiter

Ideal conductor
($R = 0$)

Superconductor





Ein würfelförmiger Permanentmagnet schwebt über einer supraleitenden Scheibe aus dem Hochtemperatur-Supraleiter $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Das Schweben ist eine Folge des Meißner-Ochsenfeld-Effekts: Ein Supraleiter verhält sich wie ein idealer Diamagnet und stößt den Permanentmagneten ab. (© 1988 Richard Megna, Fundamental Photographs)

SUPERFLUIDITY

first observed in He^4 at $T < 2.17 \text{ K}$

also: He^3 at $T < 0.003 \text{ K}$

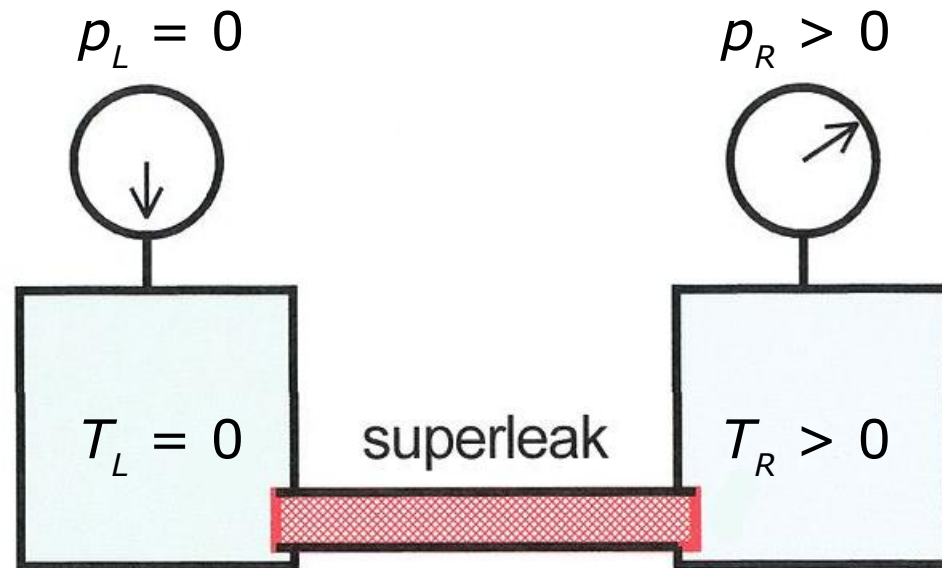
frictionless flow so long as $v < v_c \approx 20 \text{ cm/s}$

persistent circular motion

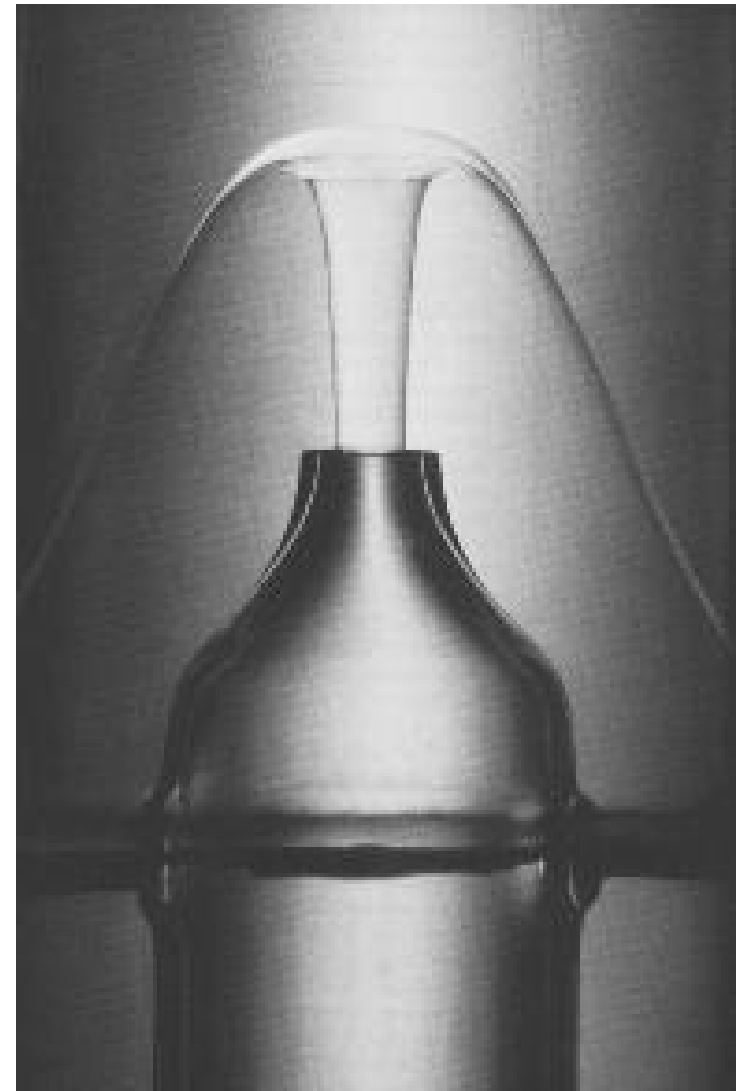
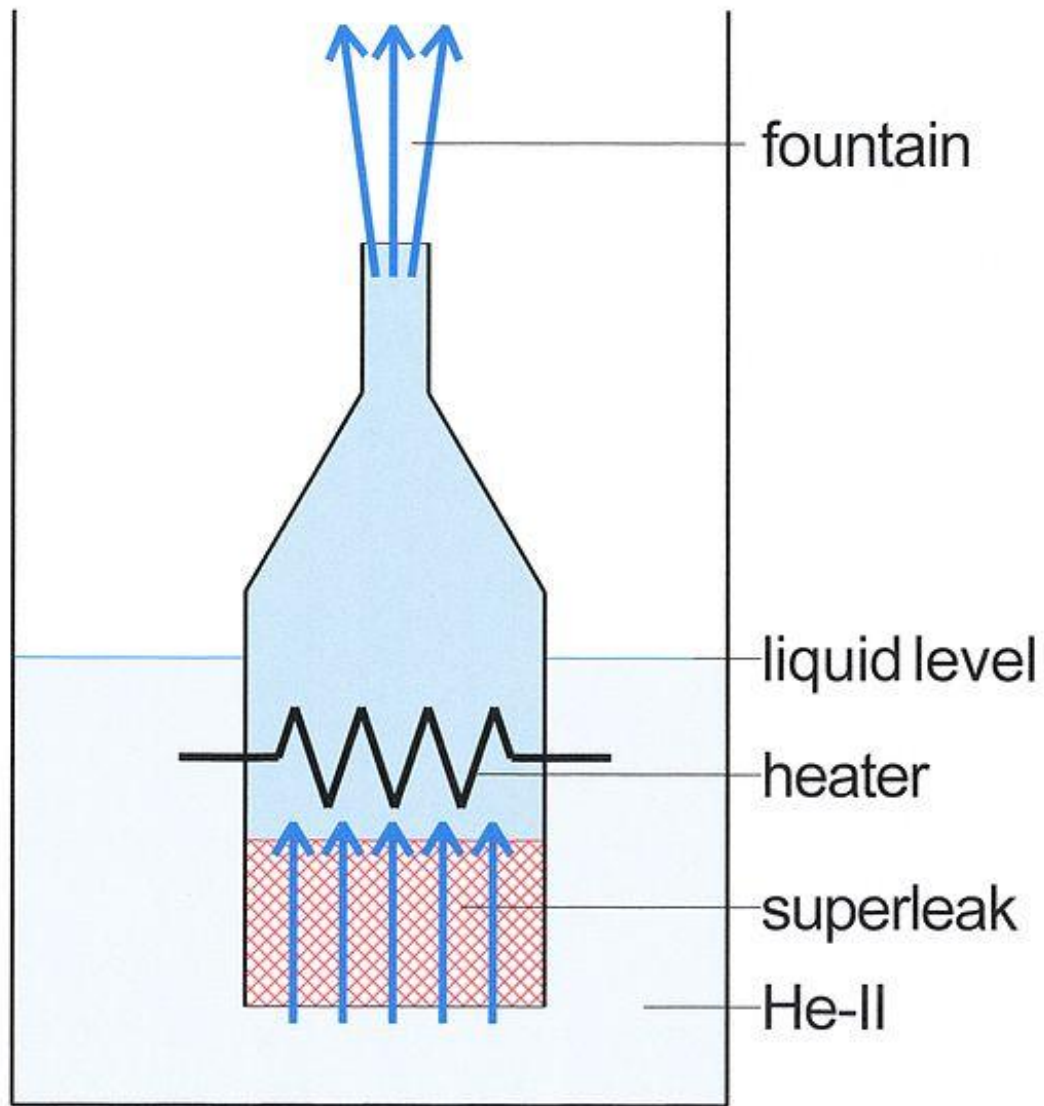
flows up walls

model: superfluid + normal fluid

"Osmotischer Druck" im Zweiflüssigkeitsmodell

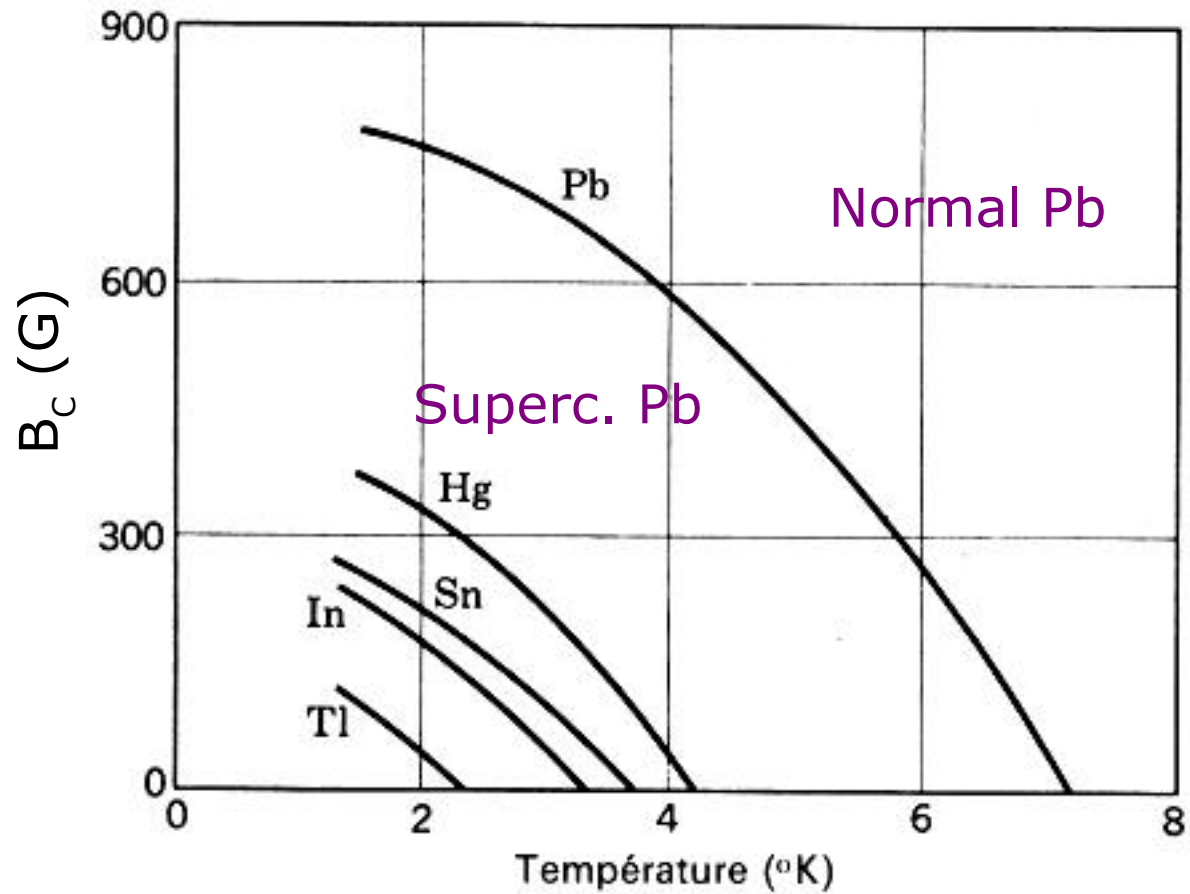


Fountain effect



Application: drive ^3He circulation in dilution refrigerators

The Critical Field $B_c(T)$



$$B_c = B_0 [1 - (T/T_c)^2]$$

Alloying Pb: Two critical fields - Type 2 SC

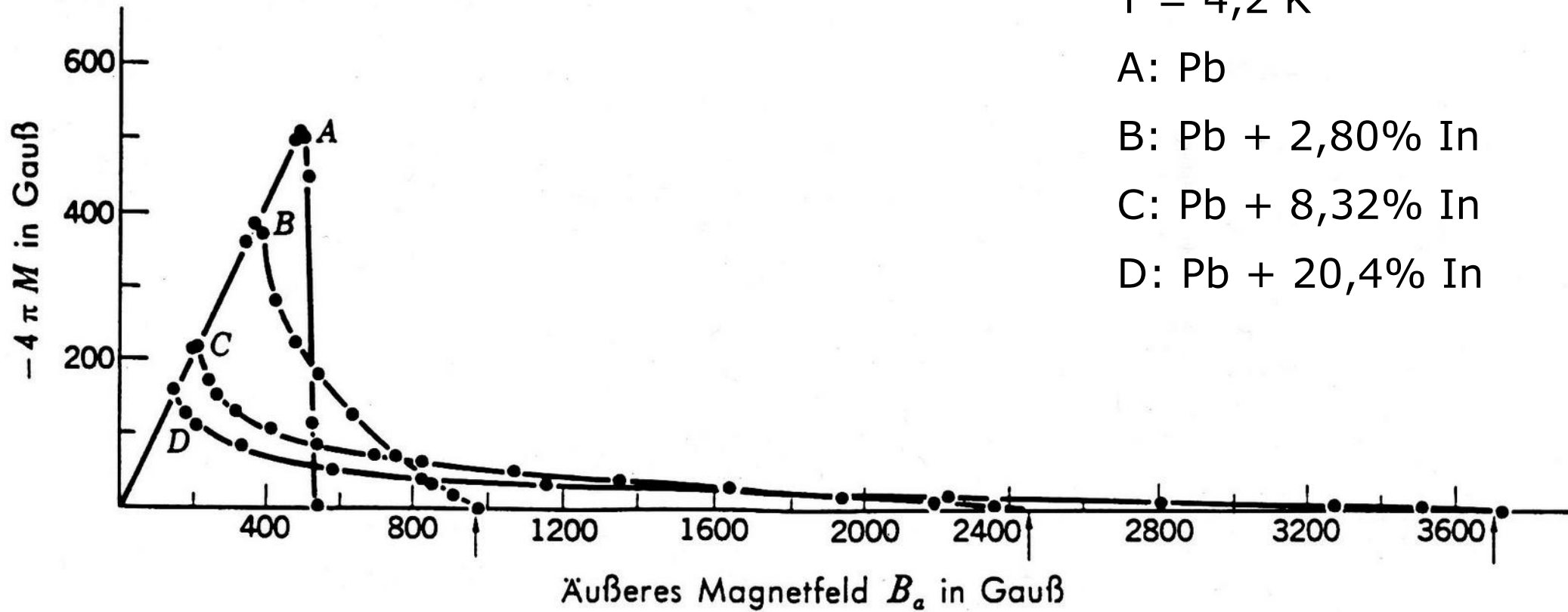
$T = 4,2 \text{ K}$

A: Pb

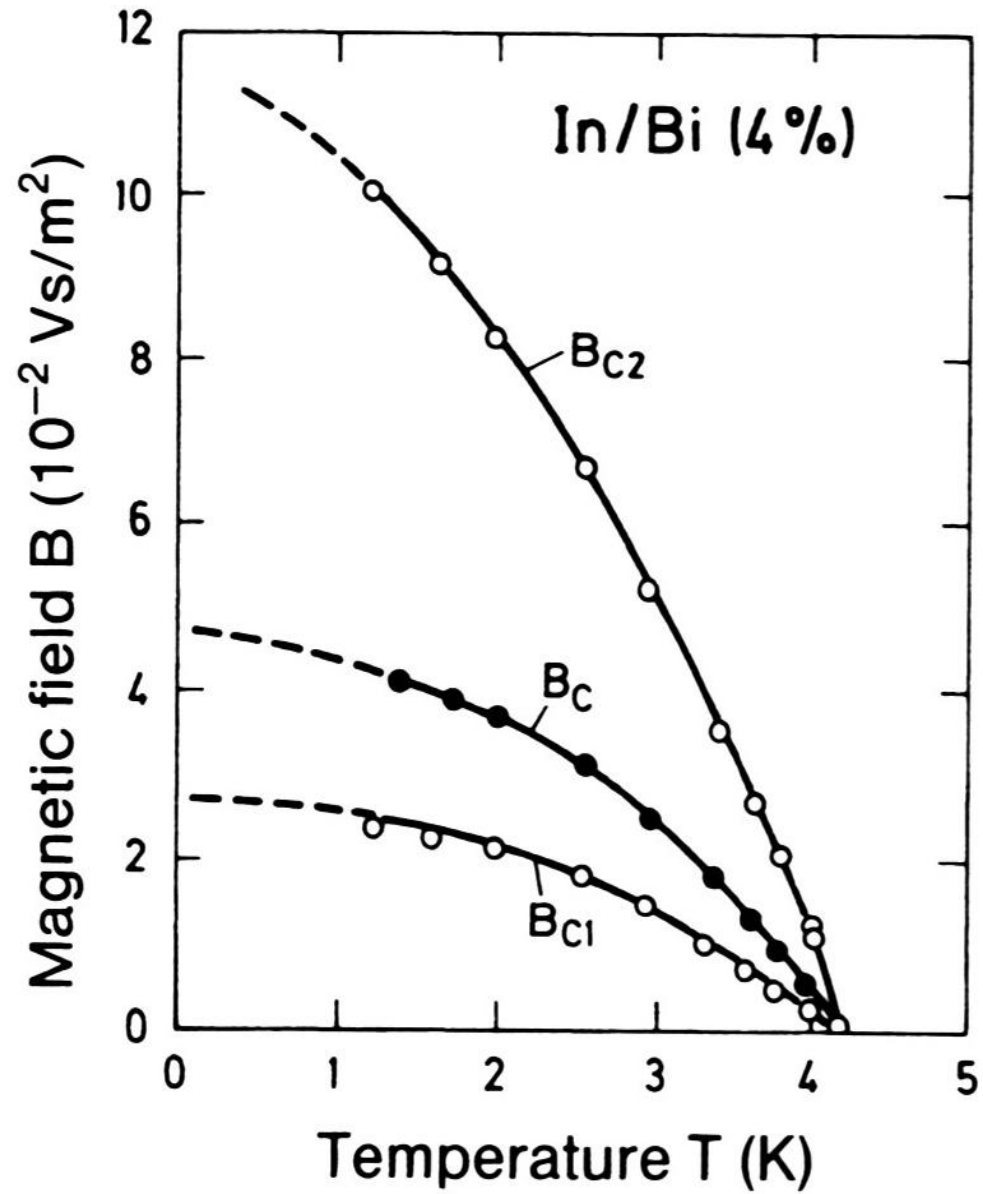
B: Pb + 2,80% In

C: Pb + 8,32% In

D: Pb + 20,4% In



$B_{C1}(T)$ and $B_{C2}(T)$



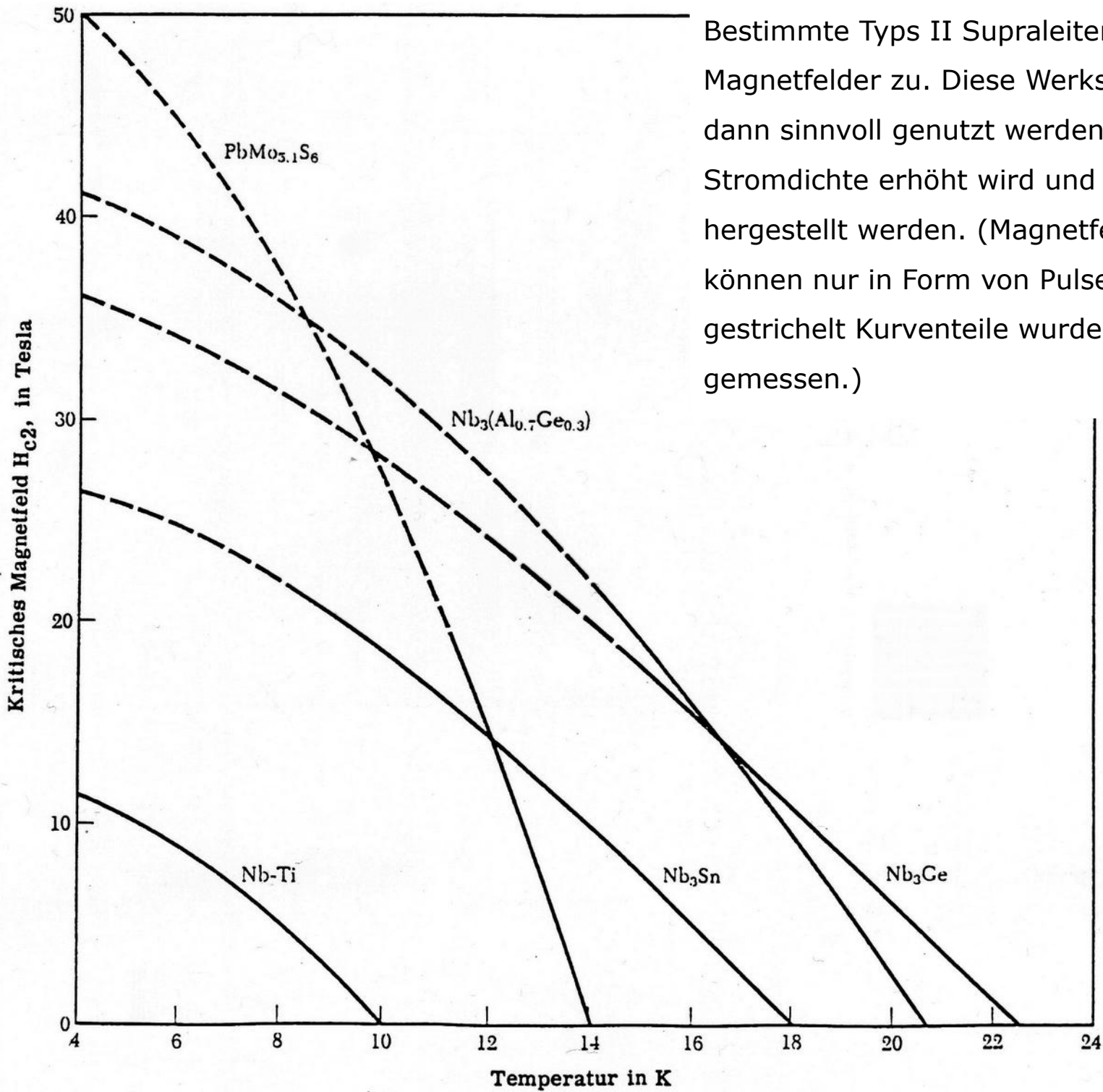
Some Type 2 Superconductors

Ruthenates

K_3C_{60}	18 K
Nb_3Ge	23.2 K
Nb_3Sn	18.1 K
V_3Si	17.1 K
V_3Ga	16.8 K
V_3In	13.9 K
$Nb_{0.6}Ti_{0.4}$	9.8 K
Tc	7.80 K

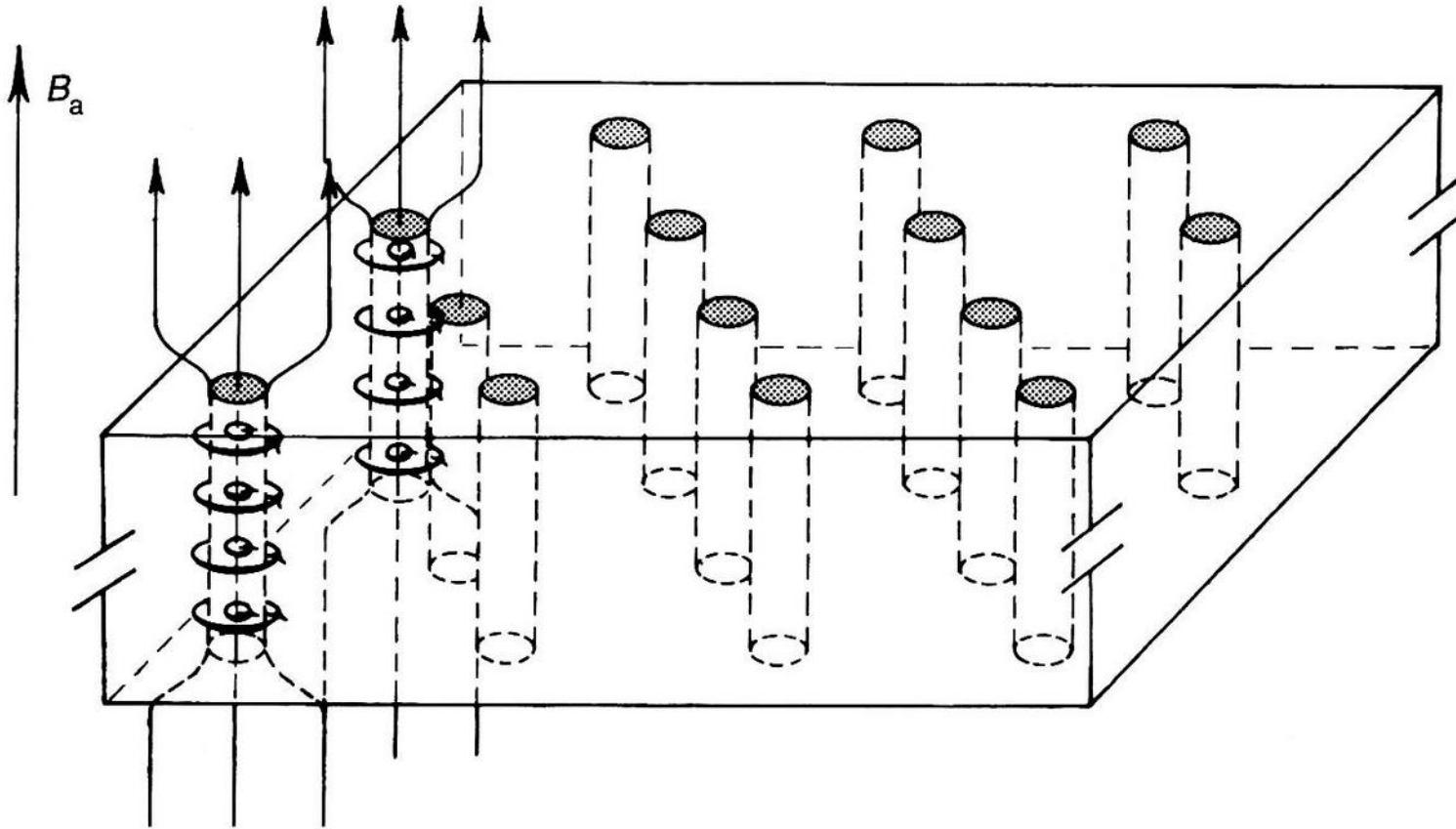
Cuprates

MgB_2	39 K
Nb_3Si	19 K
Nb_3Al	18 K
Ta_3Pb	17 K
Nb_3Ga	14.5 K
NbN	16.1 K
Nb	9.25 K
V	5.40 K



Bestimmte Typs II Supraleiter lassen unerwartet starke Magnetfelder zu. Diese Werkstoffe können jedoch erst dann sinnvoll genutzt werden, wenn ihre kritische Stromdichte erhöht wird und sie als gut getrennte Leiter hergestellt werden. (Magnetfelder von mehr als ca. 20 T können nur in Form von Pulsen erzeugt werden; gestrichelt Kurventeile wurden auf diese Weise gemessen.)

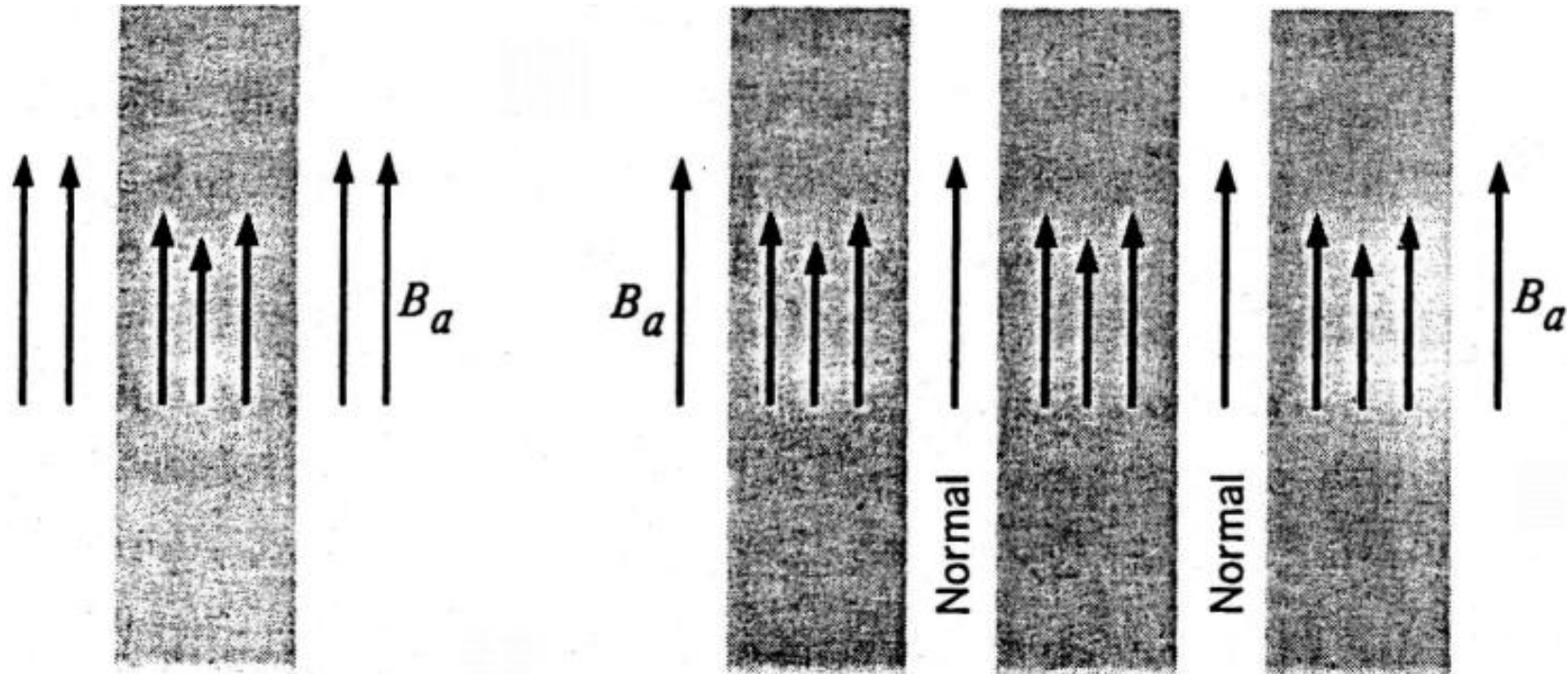
The mixed state: Shubnikov phase



(Schematic. Magnetic field and supercurrents are indicated for two flux vortices)

Eindringen eines Magnetfeldes in Supraleiter

Film, dessen Dicke ungefähr der
Londonschen Eindringtiefe λ entspricht.
Die Pfeillänge deutet die Magnetfeldstärke an.

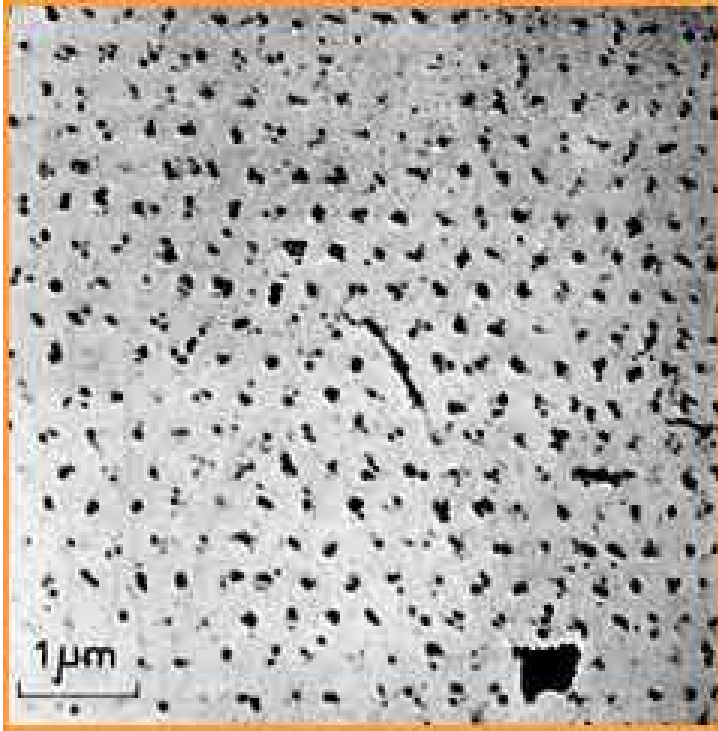


Homogene kompakte Probe im Mischzustand, bei dem sich normaleitende und supraleitende Bereiche abwechseln. Die supraleitenden Bereiche sind dünn im Vergleich zu λ . (Die N-Gebiete des Wirbelzustandes sind nicht exakt normal.)

Vortex Lattice Images

1957: Theoretical Prediction of Vortices in Type-II Superconductors

A. A. Abrikosov Soviet Physics JETP 5, 1174 (1957) Nobel prize 2003

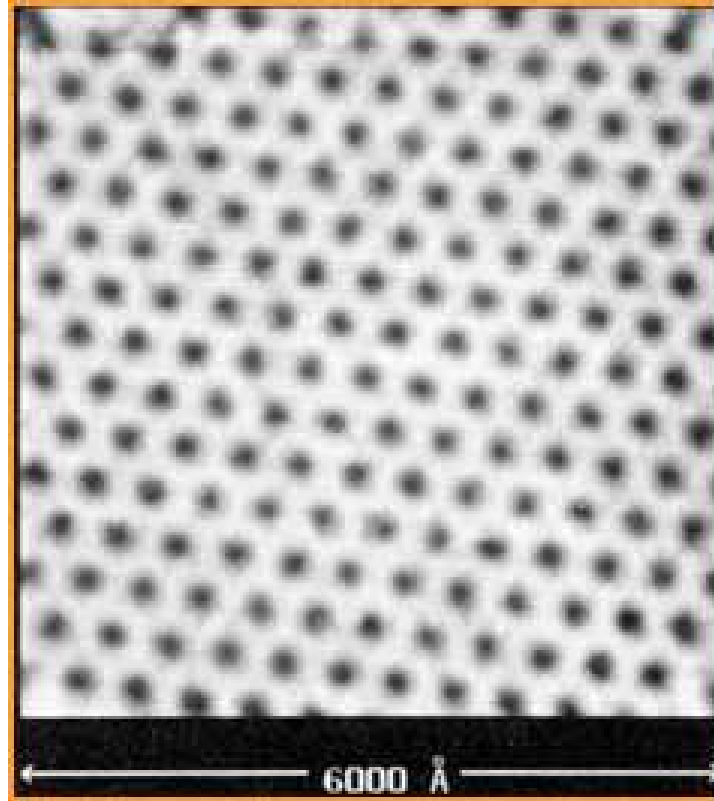


First image of Vortex lattice

Bitter Decoration, 1967

Pb-4at%In rod, 1.1 K, 195 G

U. Essmann, H. Trauble,
Phys. Lett. **24A**, 526 (1967)



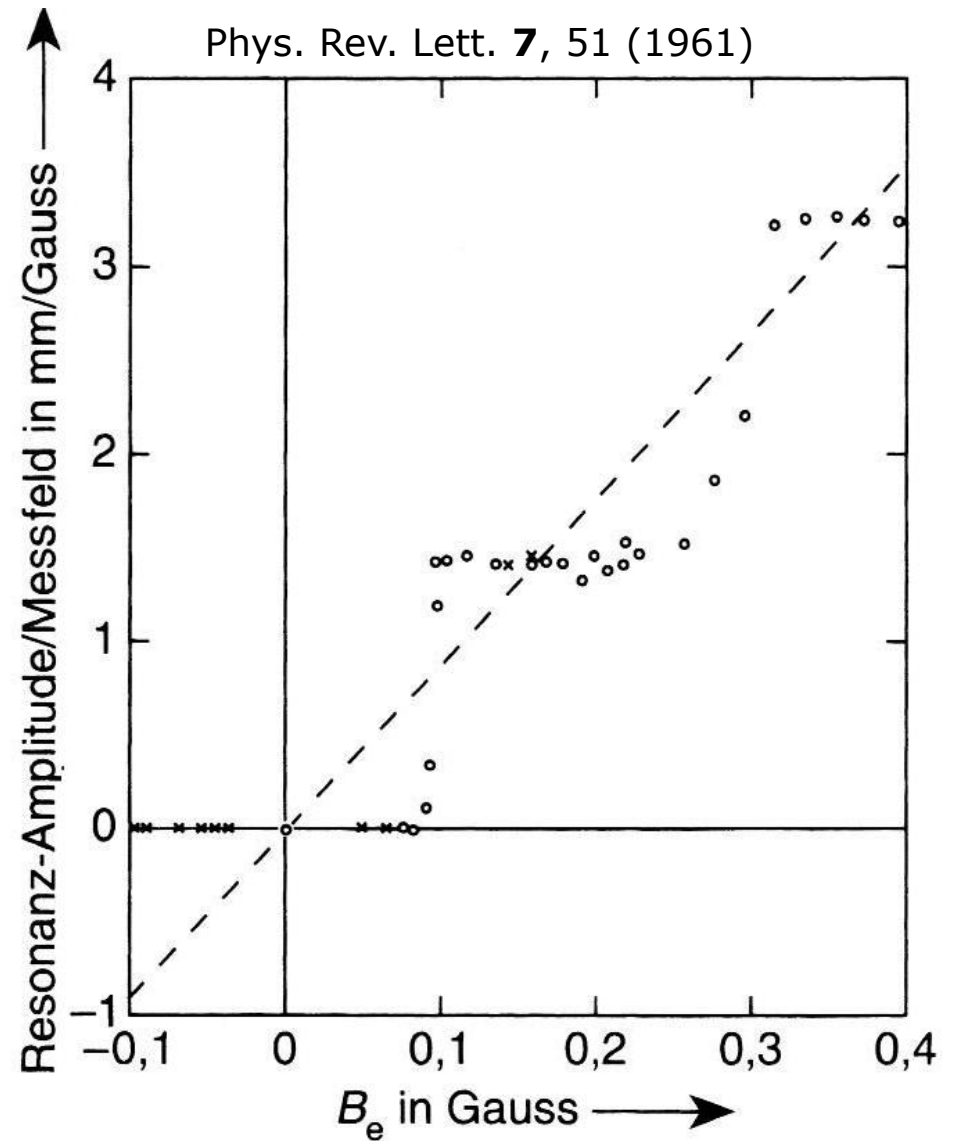
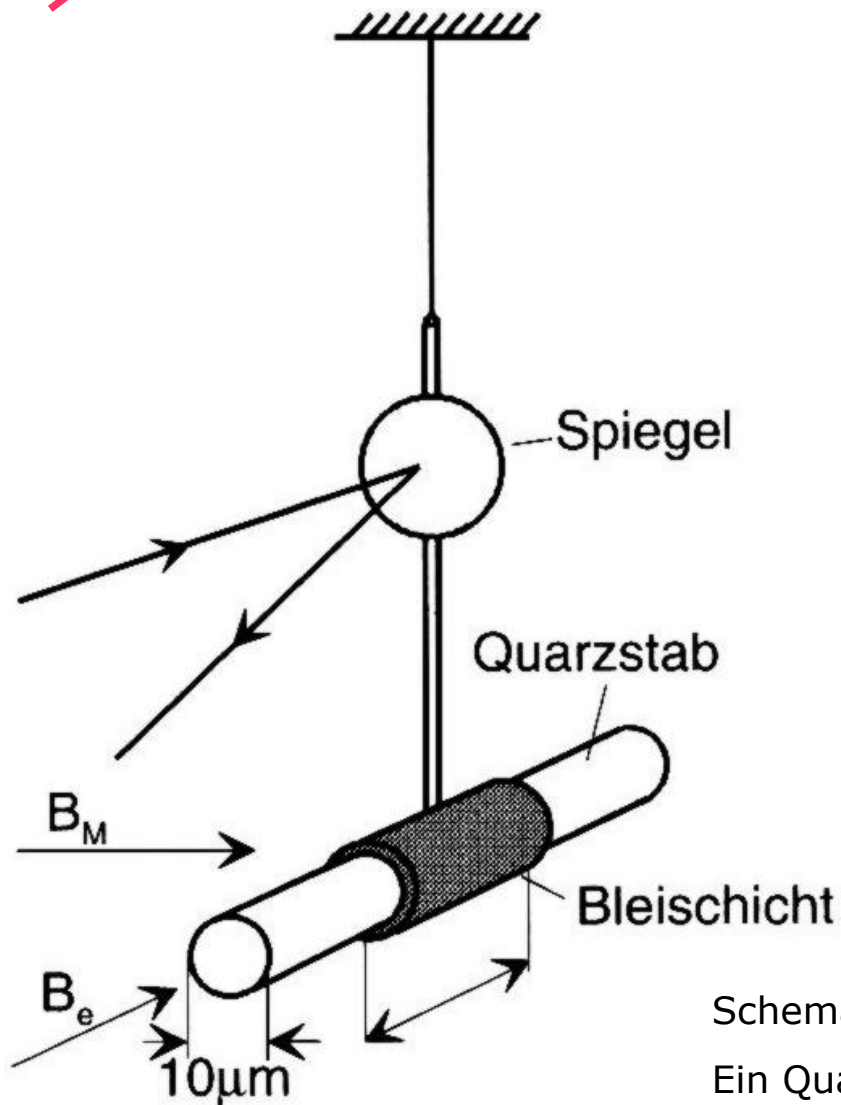
STM, 1989

NbSe₂, 1 T, 1.8 K

H. F. Hess et al.,
Phys. Rev. Lett. **62**, 214 (1989)

Fluxons

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ T m}^2$$

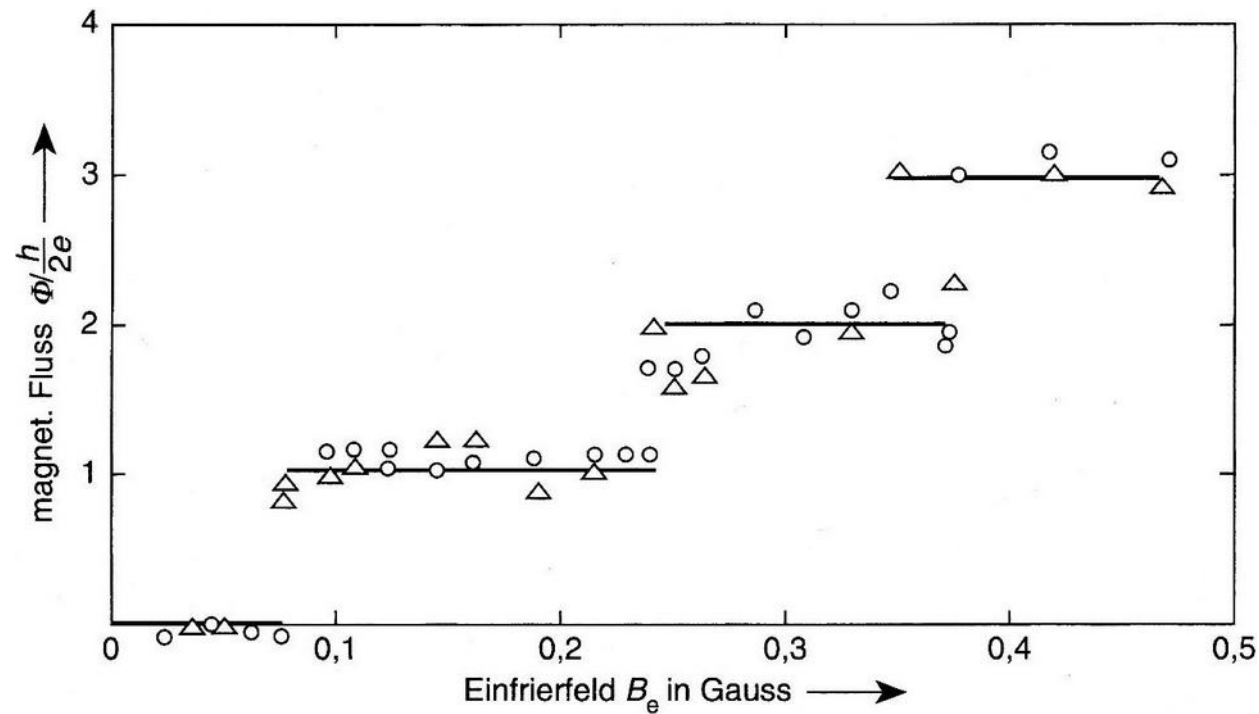


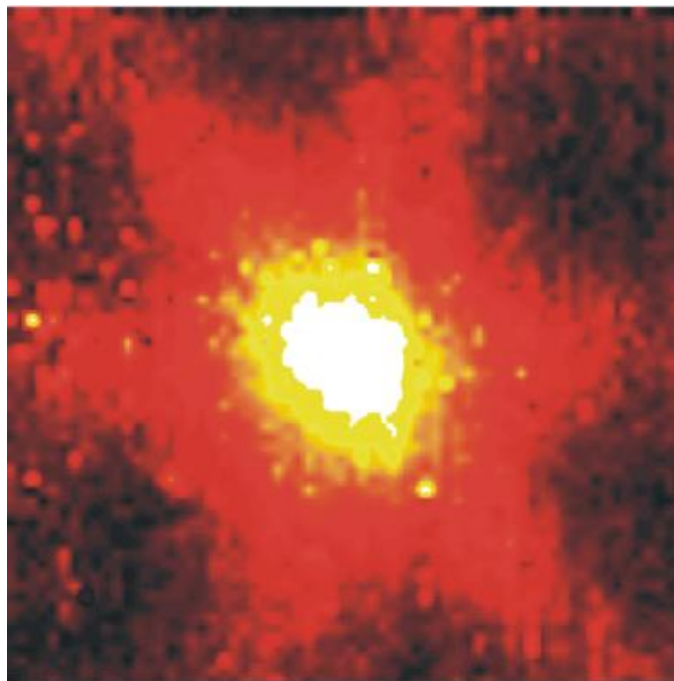
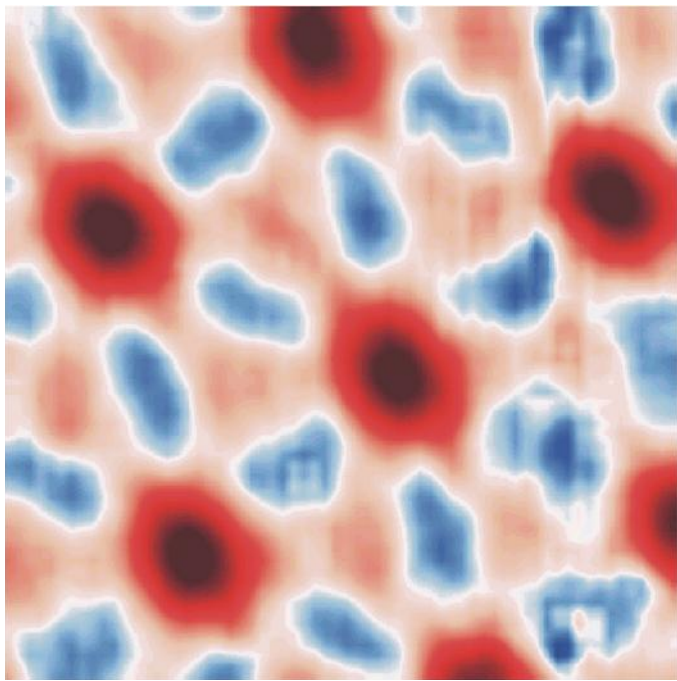
Schema des Messaufbaus von Doll und Näbauer.
Ein Quarzstäbchen mit einer aufgedampften
Bleischicht schwingt in flüssigem Helium.

Fluxons - 2. Methode

Oszillierender Zylinder mit Spulen an Enden -
Induktionsspannung messen

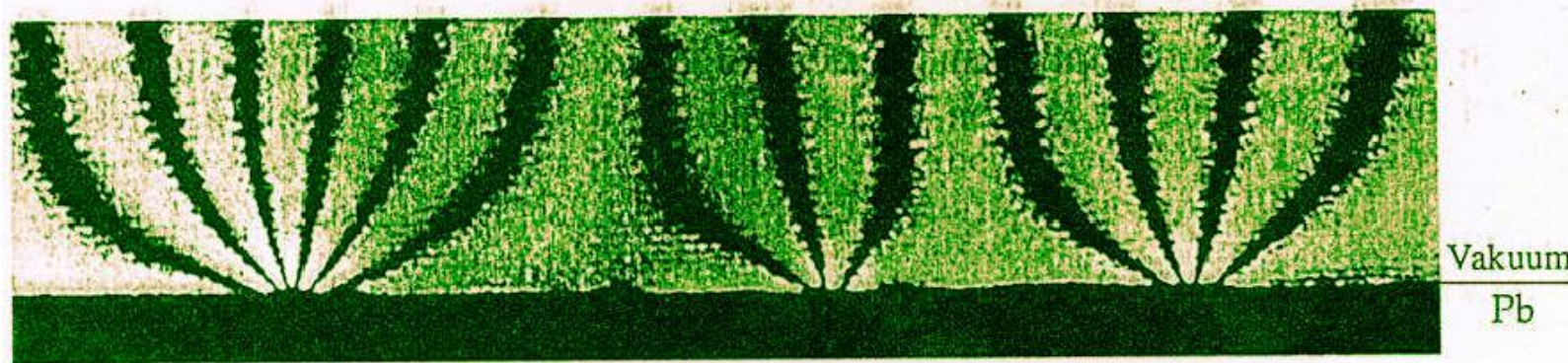
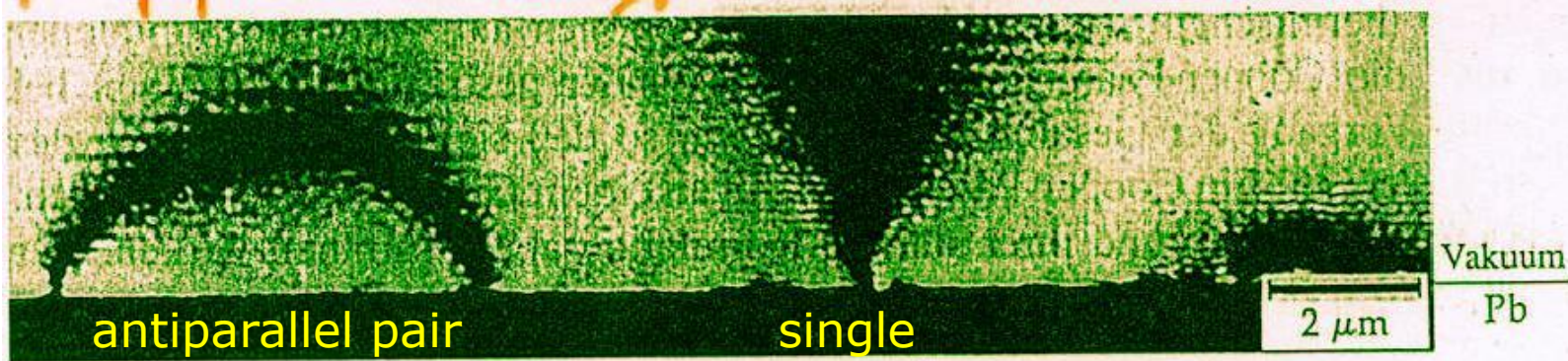
Deaver and Fairbank, Phys. Rev. Lett. **7**, 43 (1961)





STM

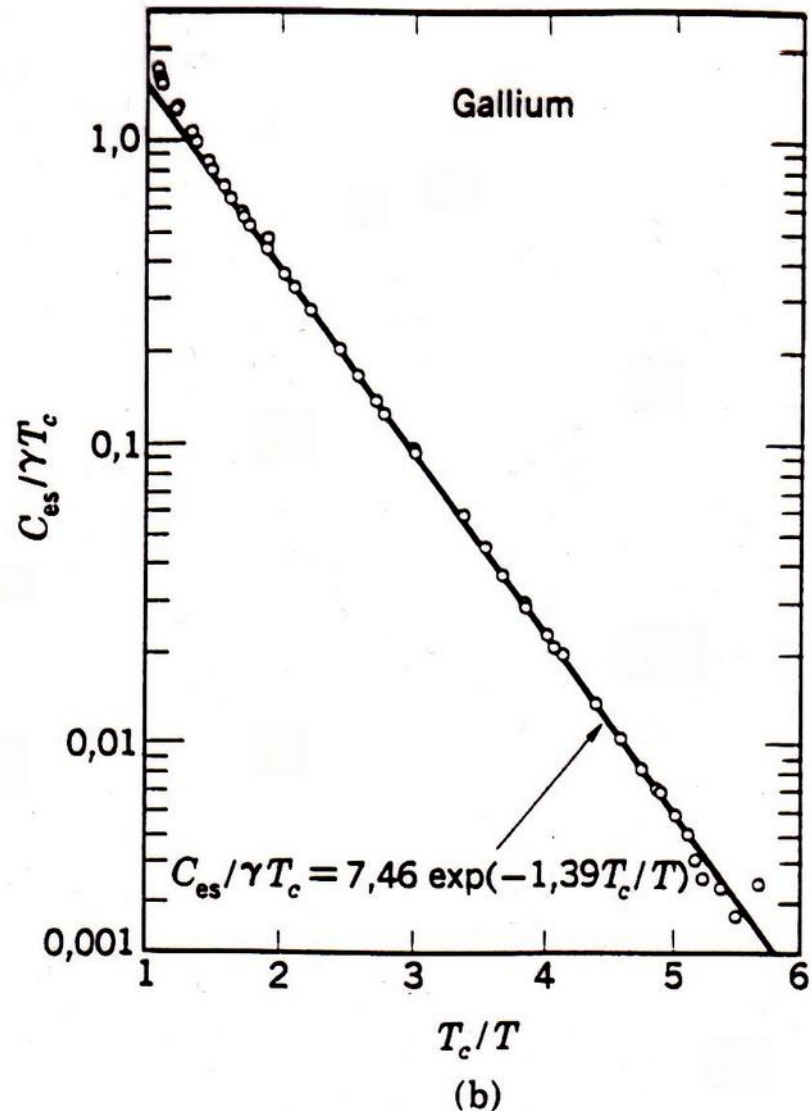
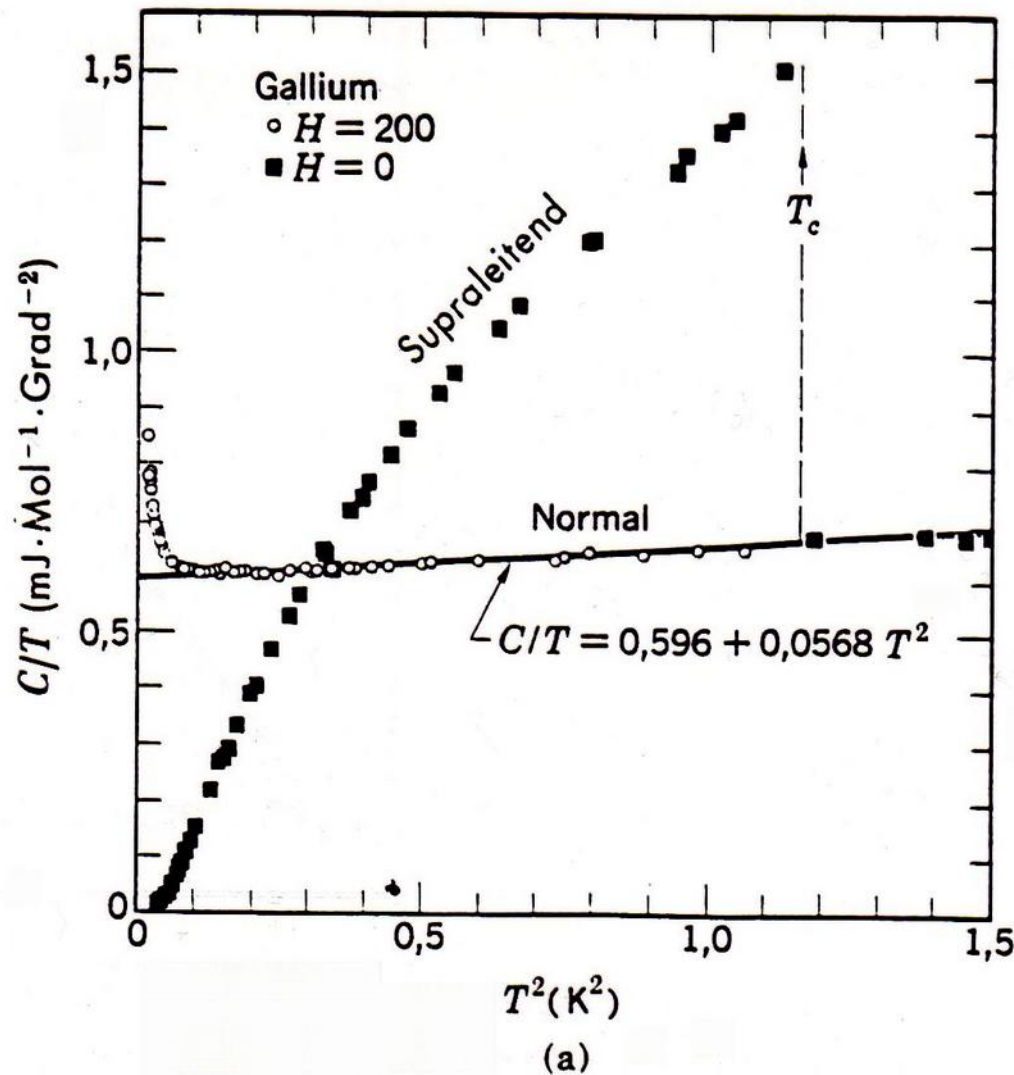
Kouwenhoven et al.,
TU Delft



Electron
Phase
Imaging
(Tonomura)

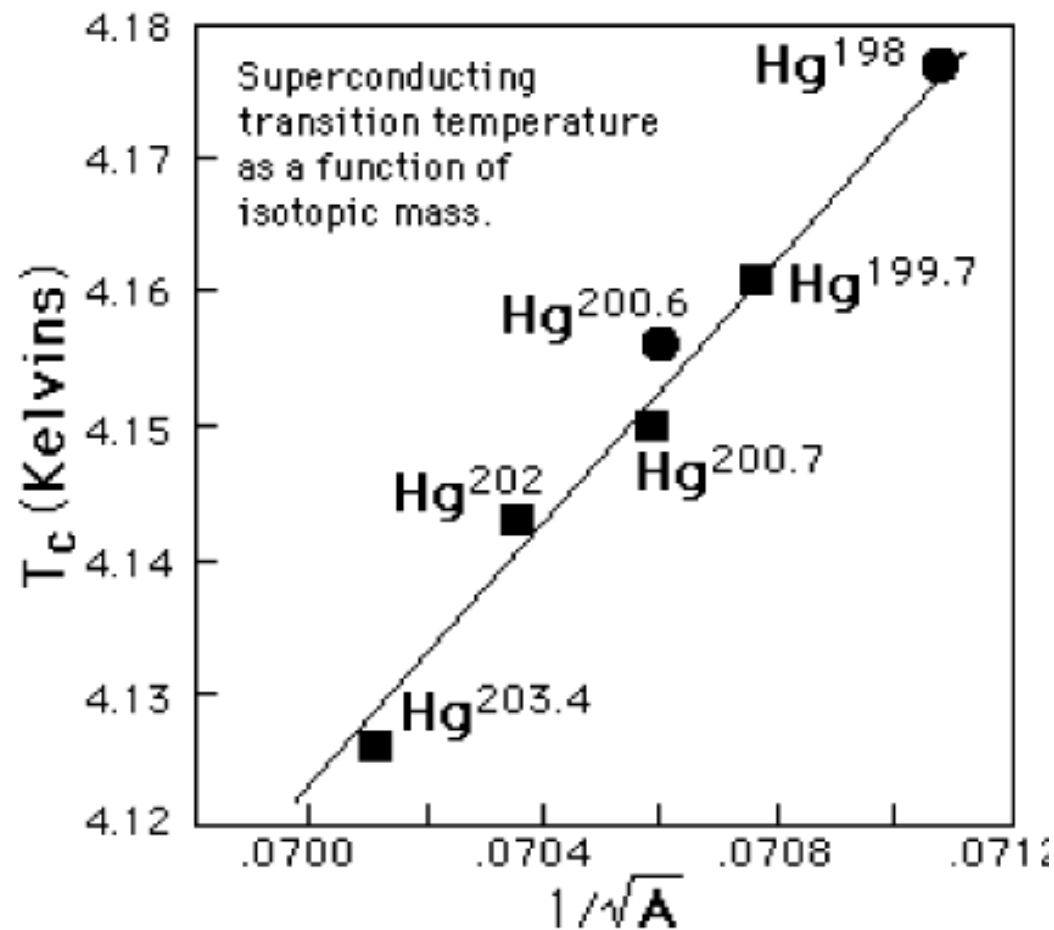
Specific heat

(a) Molwärme von Gallium im normalen und im supraleitenden Zustand. Im Normalzustand (der bei einer Feldstärke von 200 G wiederhergestellt wird) liefern Elektronen, Gitter und (bei tiefen Temperaturen) Kernquadrupole Beiträge. In (b) ist der elektronische Beitrag C_{es} zur spezifischen Wärme des supraleitenden Zustandes im logarithmischen Maßstab über T_c/T aufgetragen; die exponentielle Abhängigkeit von $1/T$ ist offensichtlich. Hier ist: $\gamma = 0,60 \text{ mJ Mol}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-2}$. [Nach N. E. Phillips].



Exponential $c(T)$ – Any ideas?

Isotope effect



● E. Maxwell, Phys. Rev. 78, 477 (1950)

■ C. A. Reynolds, et al., Phys. Rev. 78, 487 (1950)

Experimentelle Werte von α in $M^\alpha T_c = \text{const.}$

Substanz	α
Zn	$0,45 \pm 0,05$
Cd	$0,32 \pm 0,07$
Sn	$0,47 \pm 0,02$
Hg	$0,50 \pm 0,03$
Pb	$0,49 \pm 0,02$

Substanz	α
Ru	$0,00 \pm 0,05$
Os	$0,15 \pm 0,05$
Mo	$0,33$
Nb ₃ Sn	$0,08 \pm 0,02$
Zr	$0,00 \pm 0,05$

- Phonons are involved
- e-ph interaction matters

Lacking isotope shift:
band structure involved

